

Apêndice I

Análise Sísmica

Dezembro de 2019

A versão oficial deste Apêndice é a versão em língua inglesa. Em caso de qualquer contradição ou divergência de interpretação entre a versão traduzida e a versão em língua inglesa deste Apêndice, prevalecerá a versão em língua inglesa.

**Relatório do Pannel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento
da Barragem I do Feijão
Apêndice I – Análise Sísmica**

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	FONTES DE DADOS	1
2.1	Estações Sismográficas Permanentes	1
2.2	Estações de Monitoramento Portáteis.....	2
2.3	Horário do Rompimento da Barragem I	4
3.	ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DE DADOS	5
3.1	Estações Sismográficas Permanentes	5
3.1.1	Avaliação de Potenciais Eventos de Detonação	10
3.1.2	Efeito Potencial de Detonações Pré-Ruptura no CFJ	16
3.1.3	Comparação com Dados Registrados durante a Instalação do DHP 15	17
3.2	Estações de Monitoramento Portáteis.....	20
4.	CONCLUSÕES	21

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Configuração geral das estações sismográficas permanentes VL.....	2
Figura 2:	Localizações da Barragem I, Mina CFJ, estação sismográfica FJAO e estações de monitoramento portáteis	4
Figura 3:	Dados sismográficos FJAO das 10:00 às 14:00, horário local em 25 de janeiro de 2019.....	6
Figura 4:	Dados sismográficos FJAO das 12:27 às 12:35, horário local em 25 de janeiro de 2019.....	7
Figura 5:	Dados sismográficos FJAO para o Evento 1 em 25 de janeiro de 2019.....	8
Figura 6:	Dados sismográficos FJAO para o Evento 2 em 25 de janeiro de 2019.....	9
Figura 7:	Dados sismográficos da FJAO de 14:56 a 14:57, horário local em 7 de janeiro de 2019.....	11
Figura 8:	Dados sismográficos da FJAO de 11:28:30 a 11:29:30, horário local em 10 de janeiro de 2019.....	12
Figura 9:	Dados sismográficos da FJAO de 12:28 a 12:29, horário local em 14 de janeiro de 2019.....	13

**Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento
da Barragem I do Feijão
Apêndice I – Análise Sísmica**

Figura 10:	Dados sismográficos da FJAO de 13:21 a 13:22, horário local em 22 de janeiro de 2019.....	14
Figura 11:	Funções de correlação cruzada	15
Figura 12:	Velocidade de pico das partículas associada a eventos de detonação	17
Figura 13:	Dados sismográficos de FJAO de 13:45 às 13:47, horário local em 11 de junho de 2018.....	19
Figura 14:	Comparação do Evento 1 em 25 de janeiro de 2019 com o evento em 11 de junho de 2018.....	20

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Localizações da Mina CFJ, Barragem I e estações sismográficas permanentes.....	1
Tabela 2:	Localizações da Mina CFJ, Barragem I e estações de monitoramento portáteis.....	3
Tabela 3:	Detonações na CFJ de 7 a 22 de janeiro de 2019, conforme documentado nos planos de fogo disponíveis.....	10
Tabela 4:	Velocidade de pico das partículas associada a eventos de detonação	17

**Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento
da Barragem I do Feijão
Apêndice I – Análise Sísmica**

1. INTRODUÇÃO

Este Apêndice revê os dados das estações sismográficas permanentes e das estações de monitoramento portáteis com proximidade à Barragem I da Mina do Córrego do Feijão ("Barragem I") da Vale S.A. ("Vale") em Brumadinho, Brasil. O objetivo em coletar esses dados foi entender as características das vibrações registradas no solo próximas à Barragem I, na hora ou em hora próxima do rompimento da Barragem I em 25 de janeiro de 2019. Este Apêndice apresenta: (i) as fontes de dados revisadas, (ii) análises e interpretações dos dados, e (iii) conclusões.

2. FONTES DE DADOS

2.1 Estações Sismográficas Permanentes

Os dados analisados foram registrados em quatro estações sismográficas permanentes: (i) Feijão ("FJAO"), (ii) Água Limpa ("AGLP"), (iii) Bom Sucesso ("BSCB") e (iv) Diamantina ("DIAM"). FJAO e AGLP são estações na rede sismográfica Vale ("VL"); BSCB e DIAM são estações na rede sismográfica brasileira ("BL"). As localizações da mina Córrego do Feijão ("Mina CFJ"), Barragem I, e de cada estação sismográfica são apresentados na Tabela 1. A distância de cada estação sismográfica até o centro aproximado de: a (i) Barragem I e (ii) a Mina CFJ também está mostrada na Tabela 1.

Tabela 1: Localizações da Mina CFJ, Barragem I e estações sismográficas permanentes

Característica	Coordenadas		Distância calculada até a Barragem I (m)	Distância calculada até a Mina CFJ (m)
	Norte (m)	Leste (m)		
Mina CFJ ¹	7.776.519,4	591.123,6	1.662	-
Barragem I ²	7.775.080,0	591.955,0	-	1.662
FJAO ³	7.777.215,3	590.951,6	2.359	717
AGLP ³	7.794.390,1	685.476,6	95.494	96.030
BSCB ⁴	7.678.011,3	524.579,5	118.160	118.878
DIAM ⁴	7.976.637,9	641.121,0	207.468	206.270

A revisão focou na análise e interpretação de dados da FJAO devido à sua proximidade com a Mina CFJ e a Barragem I. As outras três estações estão pelo menos 40 vezes mais afastadas da

¹ Centro aproximado da escavação (Figura 2).

² Centro aproximado da barragem (Figura 2).

³ Rede Sismológica VALE (18 de junho de 2018) ("Documentos da Rede Sismológica Vale"), pág. 7.

⁴ Rede Sismográfica Brasileira. (2019). Mapa de estações sismográficas no Brasil. Extraído de <http://www.rsbr.gov.br/>

**Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento
da Barragem I do Feijão
Apêndice I – Análise Sísmica**

Barragem I. Por esse motivo, as vibrações registradas na FJAO são mais representativas daquelas que provavelmente foram experienciadas na Barragem I.

A configuração geral das estações sismográficas permanentes na rede sísmica VL é mostrada na Figura 1. Um sismógrafo post-hole digital, de banda larga *nanometrics*, modelo *Meridian Compact*, foi instalado a aproximadamente seis metros (m) de profundidade em FJAO. O sismógrafo triaxial mede a velocidade das partículas em três direções ortogonais (H1, H2, e Z).⁵

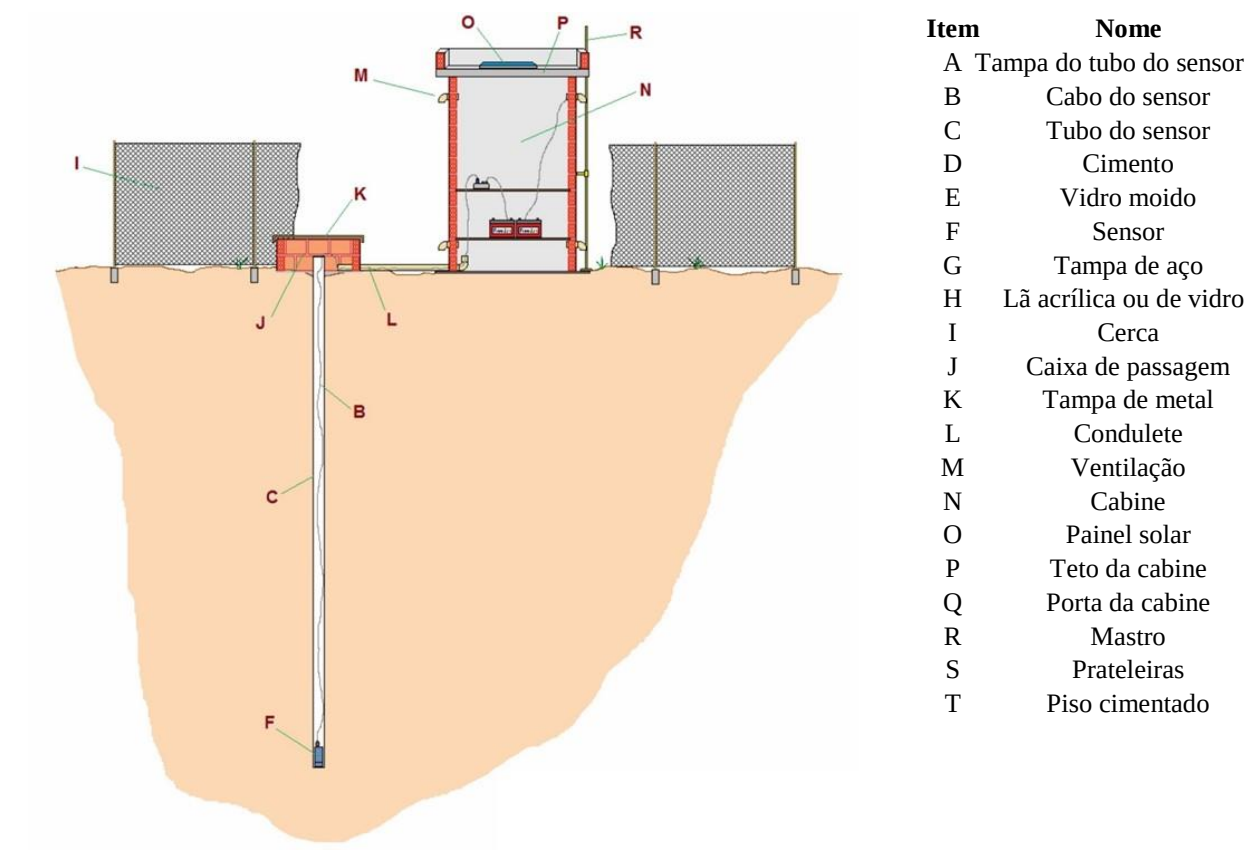


Figura 1: Configuração geral das estações sismográficas permanentes VL⁶

2.2 Estações de Monitoramento Portáteis

Além das estações sismográficas permanentes, três estações de monitoramento portáteis—designadas como PV7, PV16 e PV17—foram instaladas perto da Barragem I. As localizações da Mina CFJ, Barragem I e das estações de monitoramento portáteis estão apresentadas na Tabela 2.

⁵ Documentos da Rede Sismológica Vale; Arquivo de Dados de Metadados da FJAO; Buraco para Poste Meridian Compact. Extraído de <https://www.nanometrics.ca/products/seismometers/meridian-compact-posthole>

⁶ Documentos da Rede Sismológica Vale, pág. 5. Note que nem todos os itens marcados com letras estão incluídos no diagrama da figura.

**Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento
da Barragem I do Feijão
Apêndice I – Análise Sísmica**

A distância de cada estação de monitoramento portátil e o centro aproximado da (i) Barragem I e (ii) da Mina CFJ também é mostrada na Tabela 2. A Figura 2 mostra o local da estação sismográfica FJAO e das três estações de monitoramento portáteis relativas à Barragem I e à Mina CFJ.

Tabela 2: Localizações da Mina CFJ, Barragem I e estações de monitoramento portáteis

Característica	Coordenadas		Distância Calculada até a Barragem I (m)	Distância Calculada até a Mina CFJ (m)
	Deslocação ao Norte (m)	Deslocação ao Leste (m)		
Mina CFJ ⁷	7.776.519,4	591.123,6	1.662	-
Barragem I ⁸	7.775.080,0	591.955,0	-	1.662
PV7 ⁹	7.773.211,0	591.754,0	1.880	3.368
PV16 ⁹	7.775.093,0	591.524,0	431	1.482
PV17 ⁹	7.774.969,0	592.066,0	157	1.814

As estações de monitoramento portáteis possuem três sensores montados em direções ortogonais (transversais, longitudinais, e verticais) para registrar vibrações do solo e um microfone para registrar o ruído aéreo. Ao contrário das estações sismográficas permanentes que gravam continuamente, as estações de monitoramento portáteis são configuradas para acionar (isto é, começar a gravação) assim que a velocidade de vibração do solo exceder 5×10^{-4} metros por segundo (m/s).¹⁰

⁷ Centro aproximado da escavação (Figura 2).

⁸ Centro aproximado da barragem (Figura 2).

⁹ Laudo Técnico Sismográfico – Mina de Córrego Feijão (Vale 2019) (“Relatório de monitoramento sismográfico da Vale”), pág. 5.

¹⁰ Relatório de Monitoramento Sismográfico da Vale, págs. 8-9.

**Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento
da Barragem I do Feijão
Apêndice I – Análise Sísmica**



Figura 2: Localizações da Barragem I, Mina CFJ, estação sismográfica FJAO e estações de monitoramento portáteis¹¹

2.3 Horário do Rompimento da Barragem I

Para comparação com dados sismográficos, este Apêndice baseia-se em análise de vídeo para identificar o horário do rompimento da Barragem I. A primeira indicação visível de rompimento ocorre às 12:28:21:90, horário local, em 25 de janeiro de 2019 (Apêndice D). Conforme descrito no Apêndice D, o horário de iniciação do rompimento aqui usado foi subtraído em um segundo para explicar a diferença de tempo entre o registro de hora da câmera de vídeo e o Tempo Universal Coordenado (UTC), ajustado ao horário local (UTC -2).¹²

¹¹ Google Earth. (n.d.). Extraído em 1º de junho de 2018. Texto adicionado pelos autores.

¹² De acordo com um relatório divulgado pela Universidade de São Paulo, o horário na estação sismográfica FJAO é sincronizado através do Sistema de Posicionamento Global (GPS) e tem a precisão de aproximadamente um microssegundo. Rede Sismográfica do Quadrilátero Ferrífero - RSQF Monitoramento Sismológico, Centro de Sismologia, Universidade de São Paulo (fevereiro de 2019) (“Rede Sismográfica da USP para o Relatório do Quadrilátero Ferrífero”), pág. 63.

**Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento
da Barragem I do Feijão
Apêndice I – Análise Sísmica**

3. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DE DADOS

3.1 Estações Sismográficas Permanentes

Os dados da estação sismográfica FJAO foram fornecidos no formato de arquivo miniSEED. Metadados adicionais foram fornecidos para definir as características do sensor, como a sensibilidade. A saída do sensor bruto foi convertida para a velocidade do solo antes da interpretação: (i) eliminando a tendência de cada série temporal, (ii) usando a sensibilidade do instrumento para calcular a velocidade do solo em m/s e (iii) aplicando um filtro passa-alto com uma frequência de 1 hertz (Hz) para remover ruídos de baixa frequência.

A Figura 3 mostra os dados gravados na estação sismográfica FJAO em 25 de janeiro de 2019, entre 10:00 e 14:00, horário local. O horário de início visível do rompimento da Barragem I (12:28:21:90) também é retratado para referência. Os três sismogramas apresentam a velocidade medida das partículas em função do tempo nas direções H1, H2, e Z. Os dados sismográficos foram ajustados para o horário local (UTC -2) para facilitar as comparações com a hora do rompimento da Barragem I. Há dois eventos registrados na FJAO que ocorrem perto da hora do rompimento: (i) um evento de baixa velocidade (“Evento 1”) e (ii) um evento de velocidade maior que ocorre subsequentemente (“Evento 2”). Nenhum outro evento está aparente durante esse período de quatro horas.

**Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento
da Barragem I do Feijão
Apêndice I – Análise Sísmica**

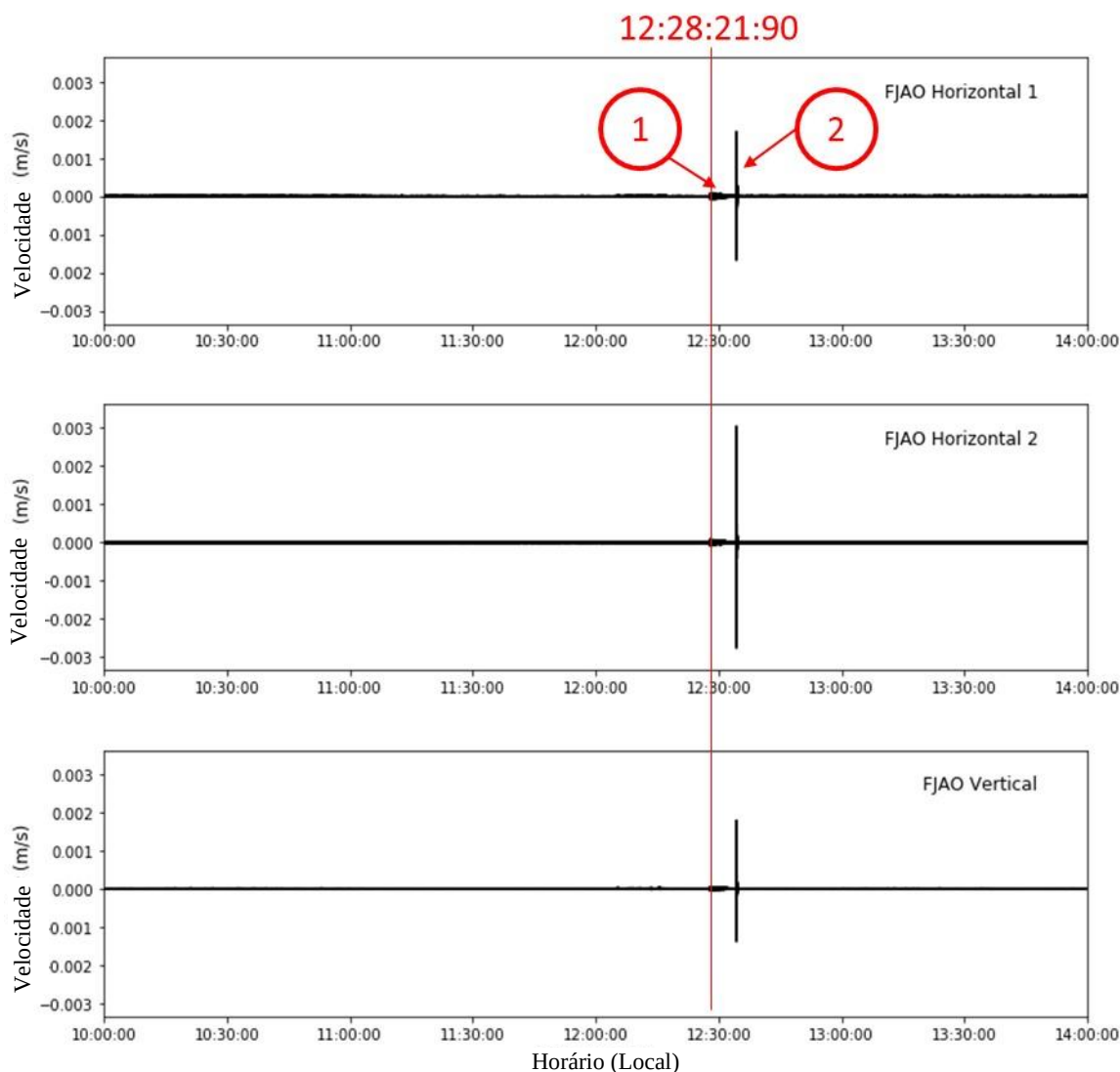


Figura 3: Dados sismográficos FJAO das 10:00 às 14:00, horário local em 25 de janeiro de 2019

A Figura 4 retrata os sismogramas traçados em uma escala de tempo ampliada das 12:27:00 às 12:35:00 do horário local. O Evento 1 parece iniciar antes da primeira indicação visível da iniciação do rompimento da Barragem I, conforme estabelecido pela análise de vídeo, e o Evento 2 ocorre aproximadamente seis minutos após a iniciação do rompimento.

**Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento
da Barragem I do Feijão
Apêndice I – Análise Sísmica**

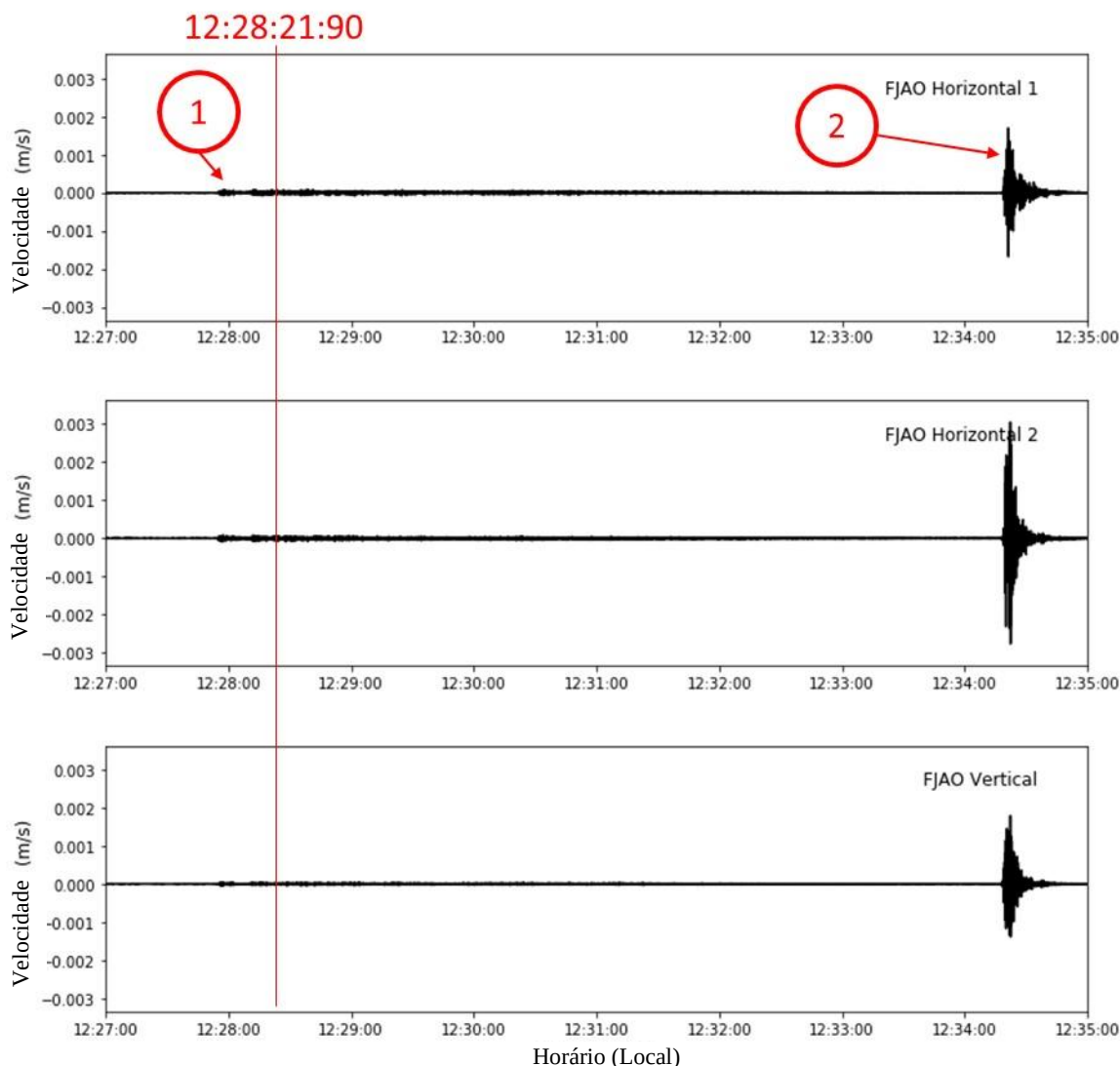


Figura 4: Dados sismográficos FJAO das 12:27 às 12:35, horário local em 25 de janeiro de 2019

As Figuras 5 e 6 são gráficos expandidos dos Eventos 1 e 2, respectivamente, para permitir que detalhes adicionais de cada evento sejam vistos. O Evento 1 iniciou aproximadamente às 12:27:54, horário local, com duração de aproximadamente seis minutos, e a velocidade de pico (gravada em H2) é de aproximadamente 9×10^{-5} m/s. O Evento 1 parece consistir em dois subeventos – um subevento inicial às 12:27:54 que teve uma duração de aproximadamente 16 segundos, seguido por um segundo evento contínuo aproximadamente às 12:28:10 no horário local. O Evento 2 se iniciou aproximadamente às 12:34:17, horário local, com uma duração mais curta de aproximadamente 10 a 20 segundos e uma velocidade maior (gravada em H2) de aproximadamente 3×10^{-3} m/s.

**Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento
da Barragem I do Feijão
Apêndice I – Análise Sísmica**

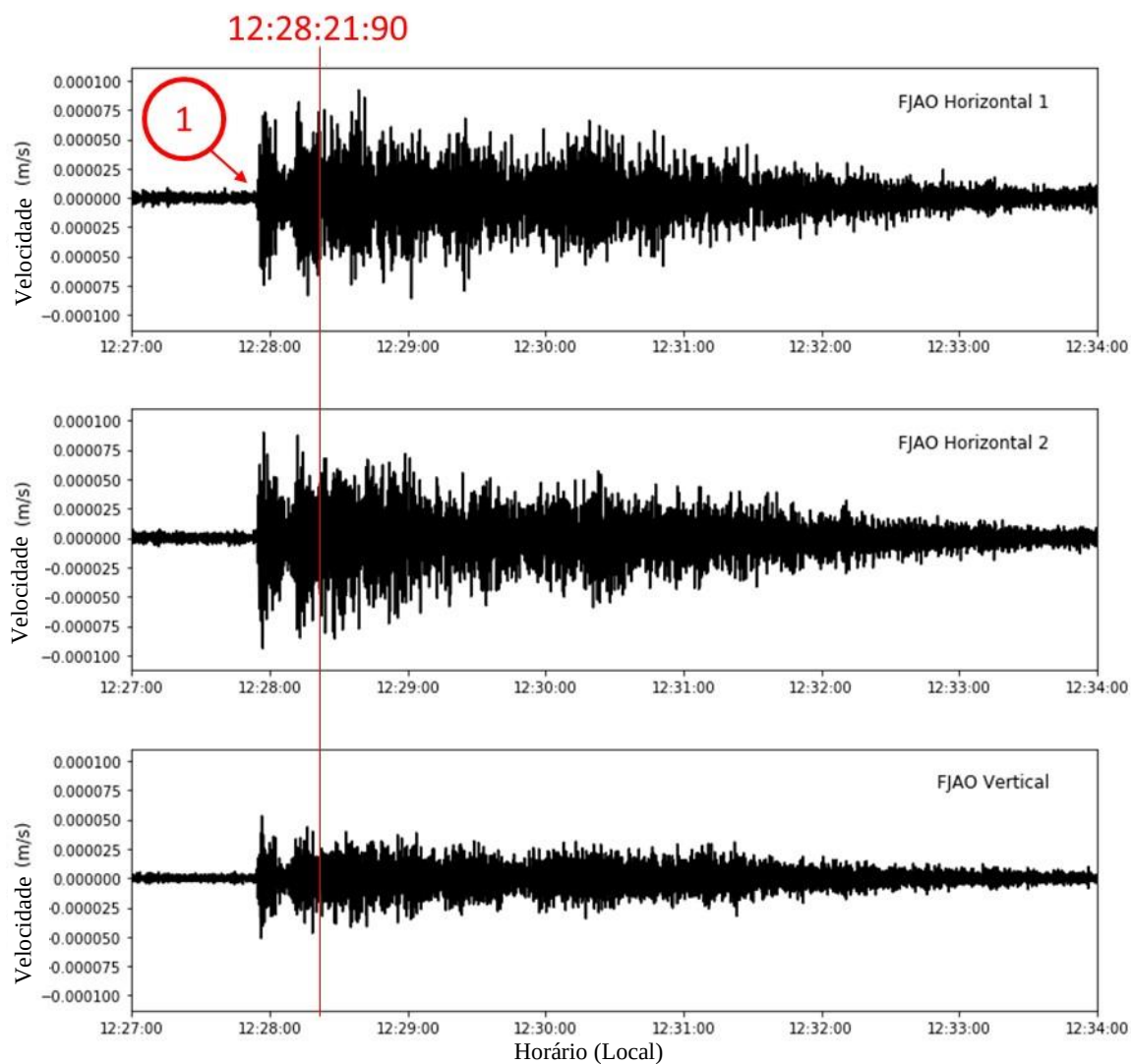


Figura 5: Dados sismográficos FJAO para o Evento 1 em 25 de janeiro de 2019

**Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento
da Barragem I do Feijão
Apêndice I – Análise Sísmica**

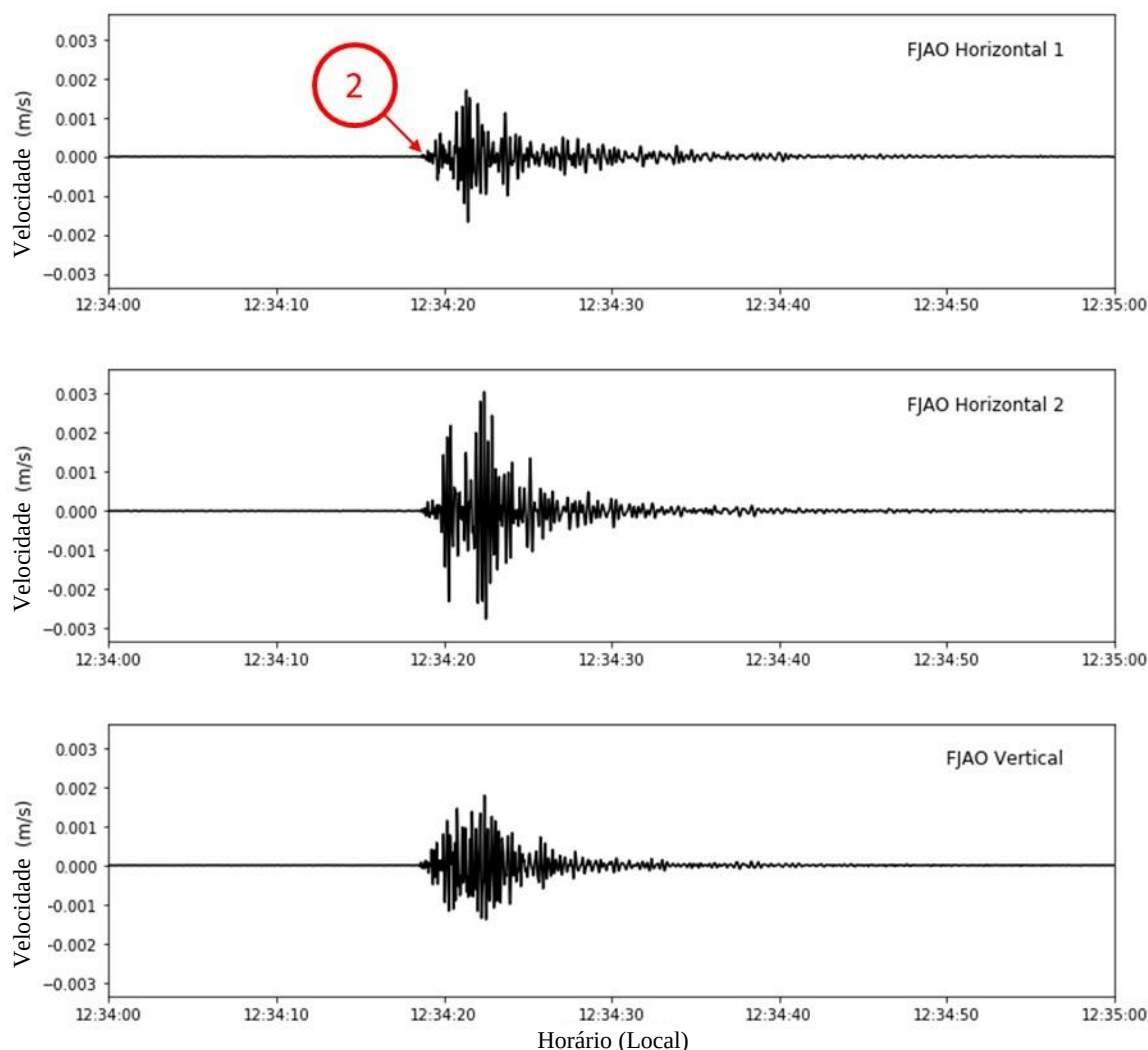


Figura 6: Dados sismográficos FJAO para o Evento 2 em 25 de janeiro de 2019

Nenhum dos eventos exibe as características de um terremoto natural em termos de duração, conteúdo de frequência ou outras propriedades da forma de onda, o que é apoiado por relatórios da Universidade de São Paulo.¹³ Além disso, em um relatório emitido após o rompimento, a Universidade de Brasília não encontrou nenhuma atividade de terremoto ocorrida em 25 de janeiro de 2019 a 100 quilômetros (km) da Barragem I.¹⁴

A velocidade de pico para o Evento 1 foi significativamente menor que os níveis mínimos seguros de vibração do solo requeridos para reduzir o potencial de dano limiar em estruturas residenciais,

¹³ Informe Revisado sobre os registros das estações da rede sismográfica da Vale, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo (28 de janeiro de 2019) (“Boletim da USP da Rede Sismográfica da Vale”); Rede sismográfica da USP para o relatório do Quadrilátero Ferrífero.

¹⁴ Informe Sísmico: Atividade sísmica na região de Brumadinho ($D \leq 100$ km) – últimos seis meses, Instituto de Geociências/Observatório Sismológico, Universidade de Brasília (29 de janeiro de 2019).

**Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento
da Barragem I do Feijão
Apêndice I – Análise Sísmica**

os quais variam de aproximadamente $1,5 \times 10^{-2}$ m/s a 5×10^{-2} m/s.¹⁵ Como estabelecido em um relatório da Universidade de São Paulo, os espectros de resposta calculados para o Evento 1 são inferiores aos calculados para vários eventos registrados na FJAO em ou antes de 25 de janeiro de 2019, incluindo terremotos naturais.¹⁶ Assim, parece que a Barragem I foi submetida a excitação sísmica maior que o Evento 1 em várias ocasiões antes do rompimento.

3.1.1 Avaliação de Potenciais Eventos de Detonação

Para avaliar se os Eventos 1 e 2 podem estar associados com eventos de detonação na CFJ, as características dos Eventos 1 e 2 foram comparadas com os dados gravados na FJAO em quatro datas anteriores: 7 de janeiro de 2019, 10 de janeiro de 2019, 14 de janeiro de 2019 e 22 de janeiro de 2019. Essas quatro datas foram selecionadas porque os planos de fogo indicam que ocorreram detonações na CFJ nesses dias nos horários mostrados na Tabela 3. Os planos de fogo são registros mantidos pela Vale que documentam o horário e o local de uma detonação, o número e a configuração dos buracos para explosivos e a massa de explosivos utilizada.

Tabela 3: Detonações na CFJ de 7 a 22 de janeiro de 2019, conforme documentado nos planos de fogo disponíveis¹⁷

Data	Horário	Local	Quantidade de perfurações	Massa de explosivos (kg)
7 de janeiro de 2019	14:50	1170 ZE	150	10.915
10 de janeiro de 2019	11:25	1170 ZE	81	8.510
14 de janeiro de 2019	11:25	1010 ZN	110	2.240+
22 de janeiro de 2019	13:10	1050 ZS	70	4.910

As Figuras 7 a 10 mostram os sismogramas gravados na FJAO nas quatro datas anteriores, em horários que correspondem aproximadamente ao horário registrado nos planos de fogo. Os sismogramas têm durações de 10 a 20 segundos e velocidades de pico que variam de aproximadamente 6×10^{-4} m/s a 3×10^{-3} m/s. As diferenças nas velocidades de pico observadas correspondem razoavelmente bem à massa variável de explosivos usada para cada detonação.

¹⁵ U.S. Bureau of Mines. (1980). Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting (Report of Investigation (RI) 8507). Washington, DC: U.S. Government Printing Office.

¹⁶ Rede Sismográfica da USP para o Relatório do Quadrilátero Ferrífero.

¹⁷ Plano de Fogo da Vale no Córrego do Feijão em 7 de janeiro de 2019; Plano de Fogo da Vale no Córrego do Feijão em 10 de janeiro de 2019; Plano de Fogo da Vale no Córrego do Feijão em 14 de janeiro de 2019; Plano de Fogo da Vale no Córrego do Feijão em 22 de janeiro de 2019.

**Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento
da Barragem I do Feijão
Apêndice I – Análise Sísmica**

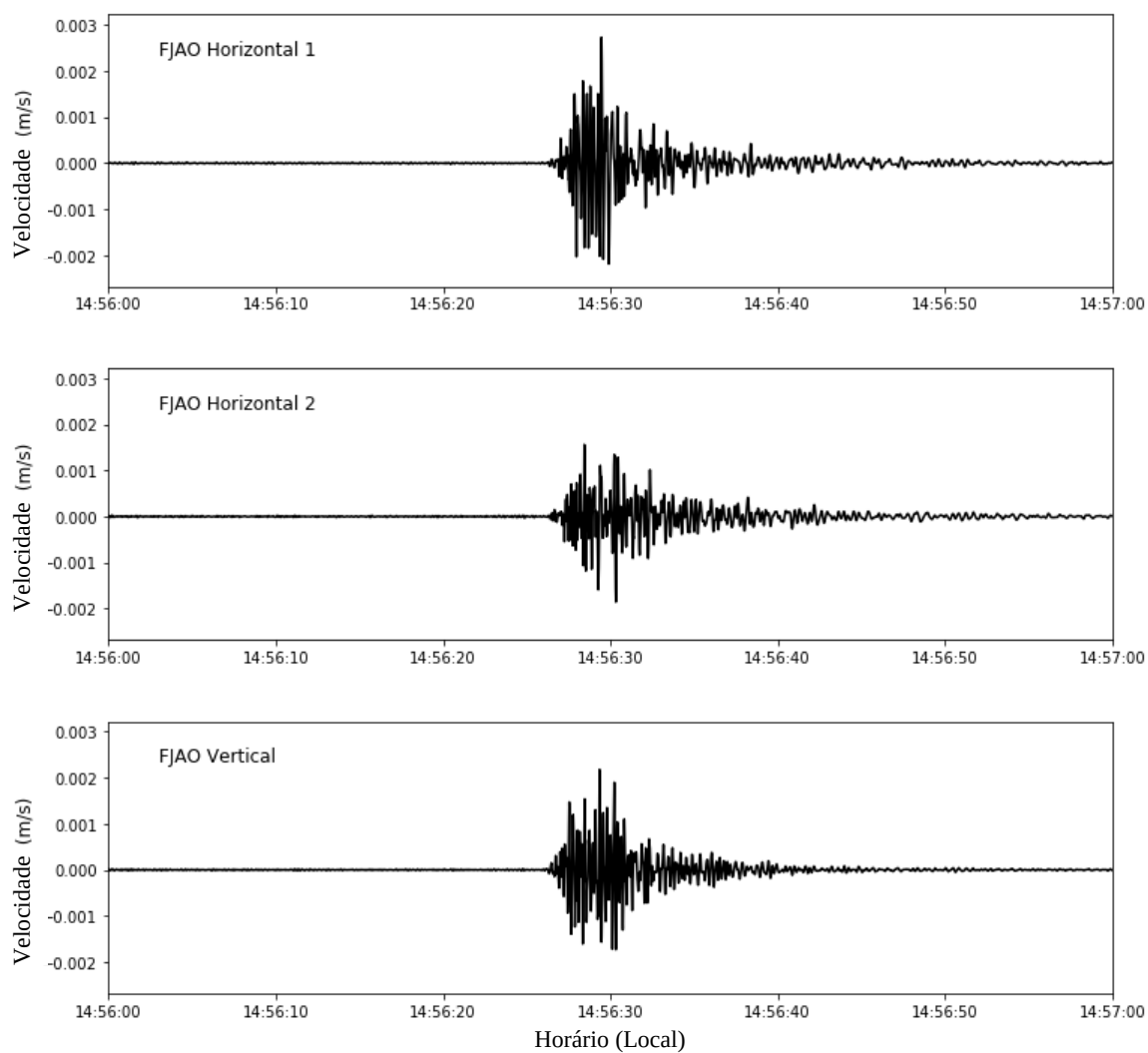


Figura 7: Dados sismográficos da FJAO de 14:56 a 14:57, horário local em 7 de janeiro de 2019

**Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento
da Barragem I do Feijão
Apêndice I – Análise Sísmica**

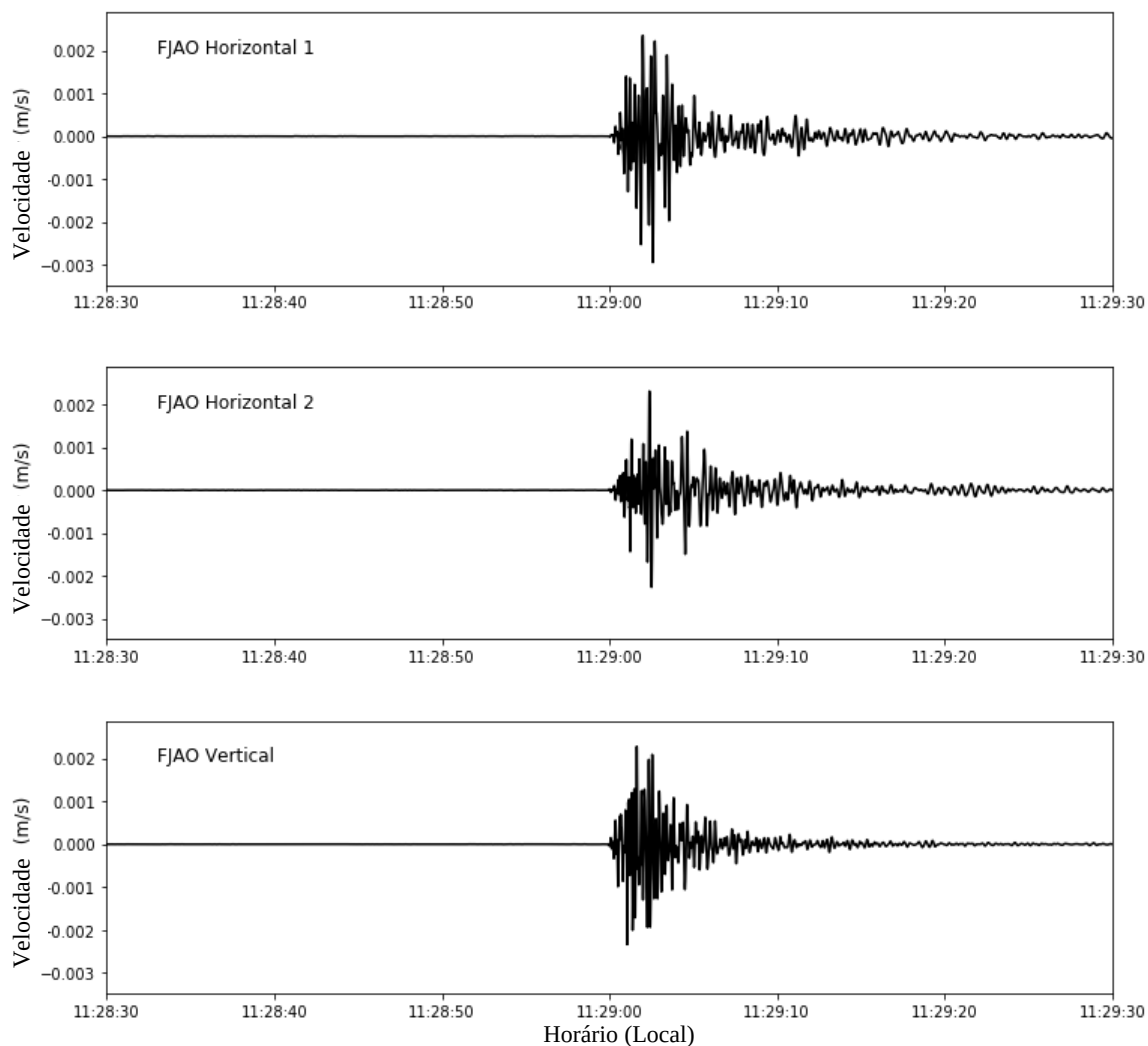


Figura 8: Dados sismográficos da FJAO de 11:28:30 a 11:29:30, horário local em 10 de janeiro de 2019

**Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento
da Barragem I do Feijão
Apêndice I – Análise Sísmica**

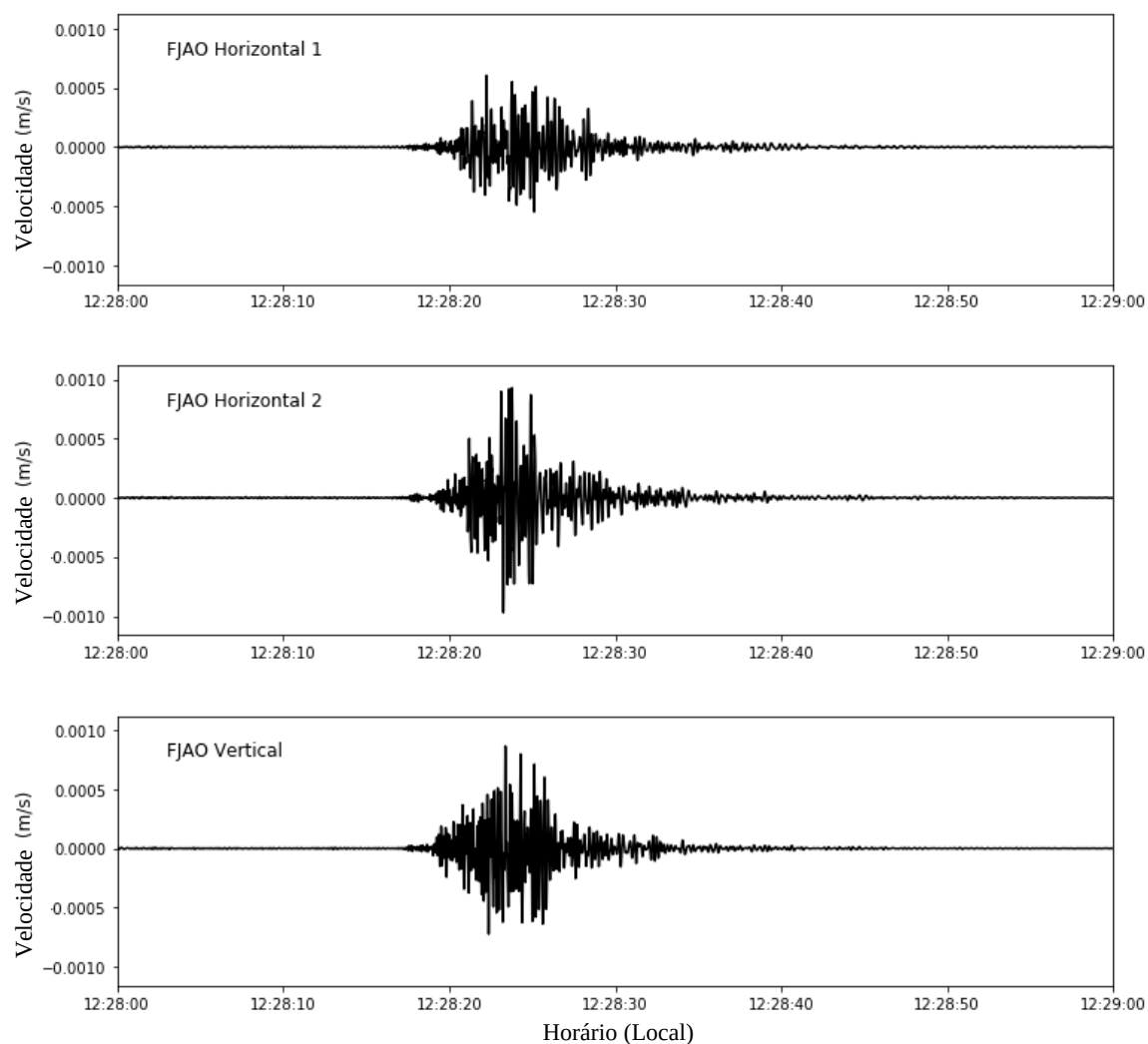


Figura 9: Dados sismográficos da FJAO de 12:28 a 12:29, horário local em 14 de janeiro de 2019

**Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento
da Barragem I do Feijão
Apêndice I – Análise Sísmica**

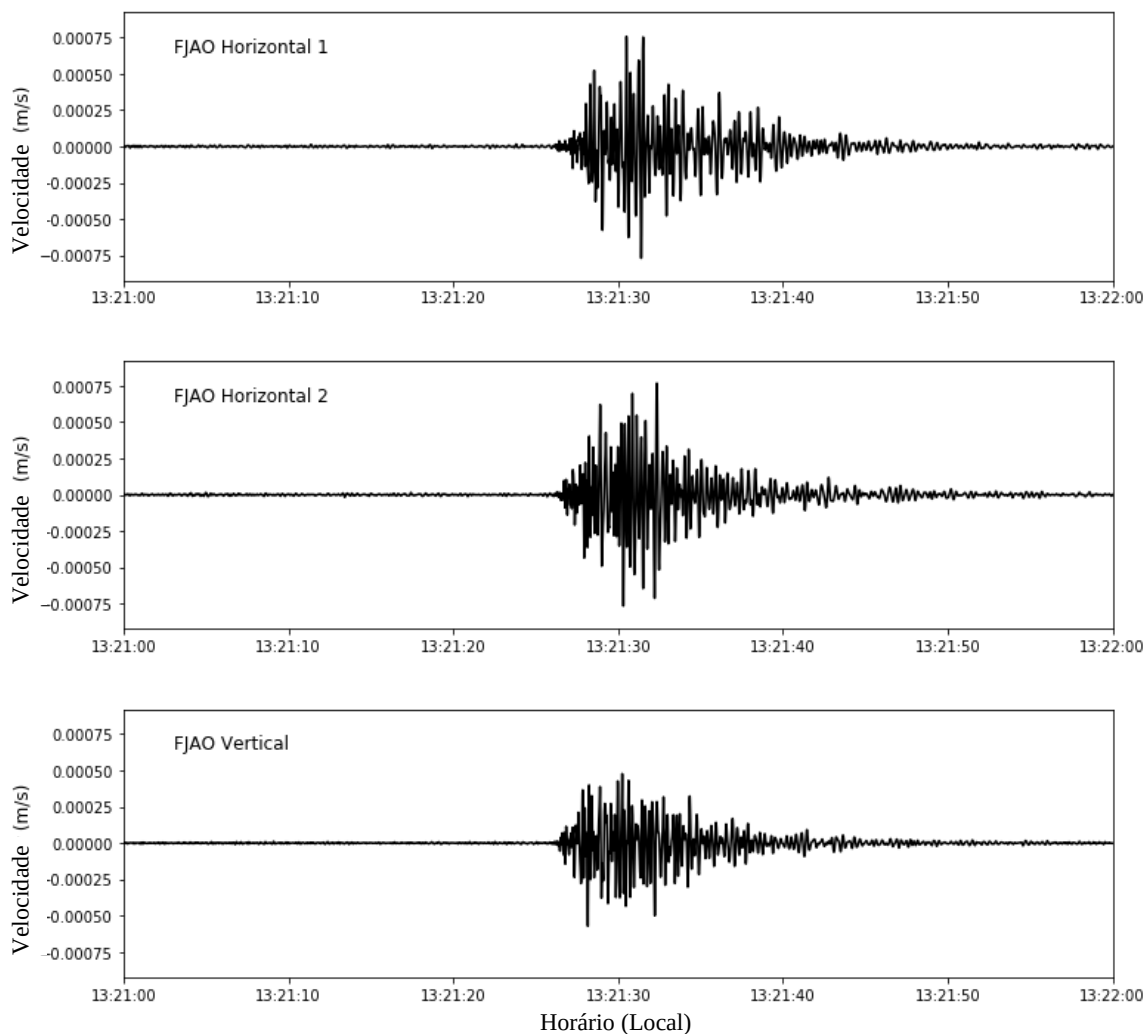


Figura 10: Dados sismográficos da FJAO de 13:21 a 13:22, horário local em 22 de janeiro de 2019

Uma comparação do Evento 1 (Figura 5) com os sismogramas nas Figuras 7 até 10 revela que o Evento 1 teve uma velocidade de pico muito mais baixa (9×10^{-5} m/s) que as detonações registradas nas quatro datas anteriores. Com base nessa comparação, pode-se concluir que o Evento 1 não foi uma detonação. Além disso, parece que a Barragem I foi submetida a vários eventos sísmicos de velocidade de pico mais alta que o Evento 1 na forma de detonações, conforme é mostrado acima, em várias ocasiões anteriores a 25 de janeiro de 2019.

Qualitativamente, o Evento 2 (Figura 6) teve uma duração (10 a 20 segundos) e velocidade de pico (3×10^{-3} m/s) muito similares às detonações registradas nas quatro datas anteriores (Figuras 7 até 10) e, portanto, o Evento 2 provavelmente é o resultado de uma detonação. Para confirmar esta interpretação, o Evento 2 foi comparado com as detonações nas quatro datas anteriores

**Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento
da Barragem I do Feijão
Apêndice I – Análise Sísmica**

quantitativamente através do cálculo da função de correlação cruzada entre cada par de sismogramas. A Figura 11 apresenta uma matriz de gráficos mostrando os resultados. Ao longo da diagonal da matriz estão as funções de correlação cruzada de cada sismograma com ele mesmo; assim, a correlação máxima é 1,0. Os gráficos fora da diagonal mostram funções de correlação cruzada entre dias diferentes. O pico bem definido em cada um dos gráficos fora da diagonal indica que os dois sismogramas estão correlacionados, confirmando a interpretação de que o Evento 2 é o resultado de uma detonação.

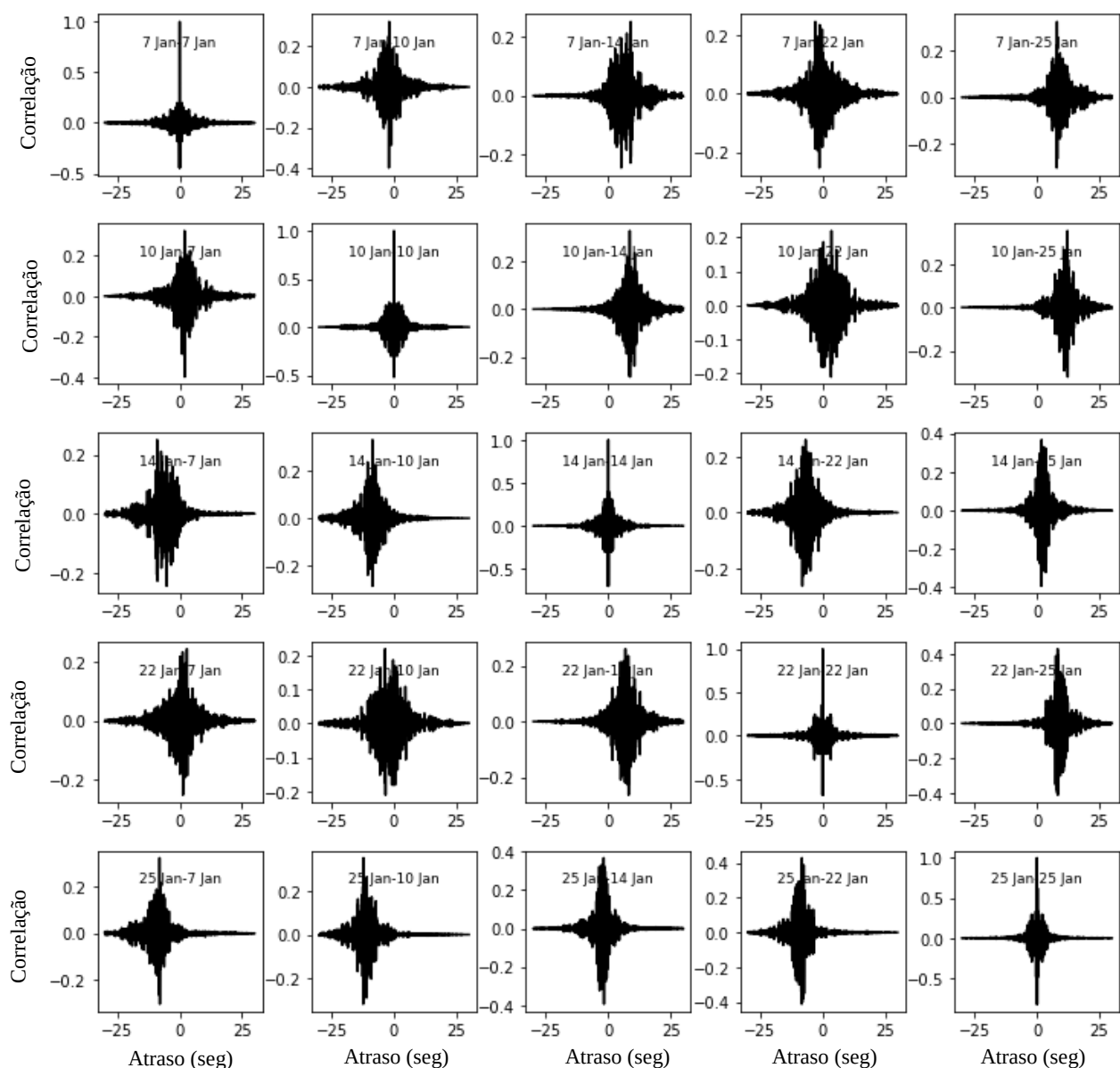


Figura 11: Funções de correlação cruzada

**Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento
da Barragem I do Feijão
Apêndice I – Análise Sísmica**

Os planos de fogo para 25 de janeiro de 2019 indicam que as detonações ocorreram às 12:00 e às 13:33, horário local, mas nenhuma vibração significativa do solo foi registrada na FJAO em nenhum momento.¹⁸ Conforme mostrado na Figura 6, o Evento 2 ocorreu às 12:34:17, horário local.

3.1.2 Efeito Potencial de Detonações Pré-Ruptura no CFJ

De maneira a considerar o efeito potencial de detonações ocorrendo na mina CFJ na Barragem I, os picos cíclicos de deformação por cisalhamento associados com cada um dos eventos de detonação gravados em FJAO nas cinco datas acima mencionadas (incluindo o Evento 2 em 25 de janeiro de 2019) foram calculados usando a seguinte equação:

Deformação por cisalhamento cíclica = Resultante da velocidade de pico das partículas / Velocidade de ondas cisalhantes

Para cada evento de detonação, a resultante da velocidade de pico das partículas foi calculada assumindo conservadoramente que a velocidade de pico das partículas para cada componente individual (H1, H2, e Z) ocorreu ao mesmo tempo. A velocidade de ondas cisalhantes foi conservadoramente presumida como 100 m/s baseado nos perfis disponíveis de velocidade de ondas cisalhantes para rejeitos na Barragem I (ver Apêndice E). Os valores correspondentes de deformação por cisalhamento cíclica para cada evento de detonação variam entre aproximadamente 1×10^{-3} até 5×10^{-3} por cento. Estes valores são aproximadamente uma ordem de magnitude menor que o (mínimo) limiar de deformação por cisalhamento de 3×10^{-2} por cento para solos sugerido por Dobry e Abdoun (2015).¹⁹

¹⁸ Planos de Fogo da Vale no Córrego do Feijão para 25 de janeiro de 2019.

¹⁹ Dobry, R. & Abdoun, T. (2015) Cyclic shear strain needed for liquefactions triggering and assessment of overburden pressure factor K_σ .” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(11).

**Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento
da Barragem I do Feijão
Apêndice I – Análise Sísmica**

Tabela 4: Velocidade de pico das partículas associada a eventos de detonação

		Velocidade de Pico de Partícula (m/s)				
Data	Hora Local	H1	H2	Z	Resultante	Tensão cíclica de cisalhamento (%)
7-Jan-19	14:56:26	2.73E-03	1.85E-03	2.18E-03	3.95E-03	3.95E-03
10-Jan-19	11:29:00	2.94E-03	2.31E-03	2.34E-03	4.41E-03	4.41E-03
14-Jan-19	12:28:18	6.06E-04	9.70E-04	8.65E-04	1.43E-03	1.43E-03
22-Jan-19	13:21:26	7.69E-04	7.68E-04	5.72E-04	1.23E-03	1.23E-03
25-Jan-19	12:34:17	1.69E-03	3.05E-03	1.79E-03	3.92E-03	3.92E-03

3.1.3 Comparação com Dados Registrados durante a Instalação do DHP 15

Em 11 de junho de 2018, o DHP 15 foi instalado perto do pé da Barragem I. Entre aproximadamente 8:20 e 12:00, horário local, um furo de sondagem foi avançado usando uma broca tricone. A partir das 13:00, horário local, o revestimento de sondagem foi instalado no furo de sondagem. Em algum momento entre aproximadamente 14:00 e 16:30, horário local, foi observada uma descarga de água e finos a aproximadamente 15 m e 7 m acima de onde o DHP 15 estava sendo instalado. Assim que a descarga foi observada, as atividades de perfuração foram paradas.²⁰ Pequenas mas rápidas deformações na barragem foram detectadas pelo radar terrestre entre 13:53 e 15:16, horário local, conforme registrado pelo computador ao qual o radar estava conectado, conforme discutido no Apêndice D.

Os dados gravados em FJAO em 11 de junho de 2018 foram revistos para comparar as vibrações do solo medidas no dia da instalação do DHP 15 com as gravadas em 25 de janeiro de 2019. O único evento observado entre 8:00 e 16:00, horário local, que excedeu os níveis de ruído ambiental, ocorreu aproximadamente às 13:46, horário local. A Figura 12 mostra os dados registrados em FJAO entre 13:00 e 16:00, horário local. O evento que ocorre aproximadamente às 13:46, horário local, tem uma velocidade de pico de aproximadamente 7×10^{-5} m/s. A Figura 13 mostra uma visualização expandida do evento que indica a duração de aproximadamente 25 segundos.

²⁰ Consulte o Apêndice A para mais detalhes sobre o incidente do DHP 15.

**Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento
da Barragem I do Feijão
Apêndice I – Análise Sísmica**

O evento em 11 de junho de 2018 foi comparado ao Evento 1 de 25 de janeiro de 2019 para avaliar se há semelhanças entre os registros sismográficos dos dois eventos. O evento em 11 de junho de 2018 teve uma velocidade de pico semelhante ao Evento 1 em 25 de janeiro de 2019. A duração foi muito menor comparada com a duração total do Evento 1. No entanto, conforme mostrado na Figura 14, a duração do evento em 11 de junho de 2018 foi semelhante à duração do subevento inicial associado ao Evento 1. Ambos os eventos foram pequenos em velocidade e significativamente menores que os eventos de detonação que ocorreram na barragem em ocasiões anteriores.

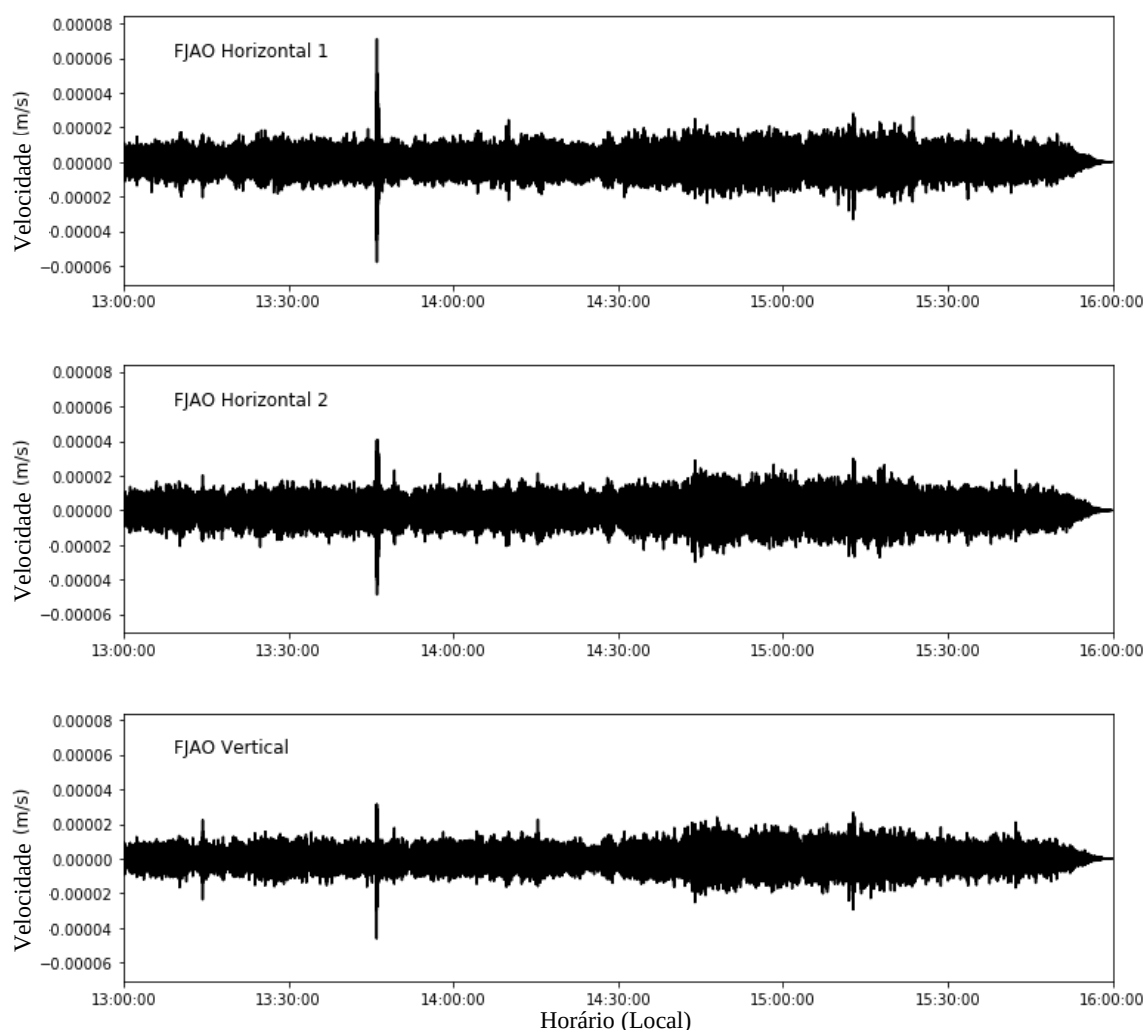


Figura 12: Dados sismográficos de FJAO de 13:00 às 16:00, horário local em 11 de junho de 2018

**Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento
da Barragem I do Feijão
Apêndice I – Análise Sísmica**

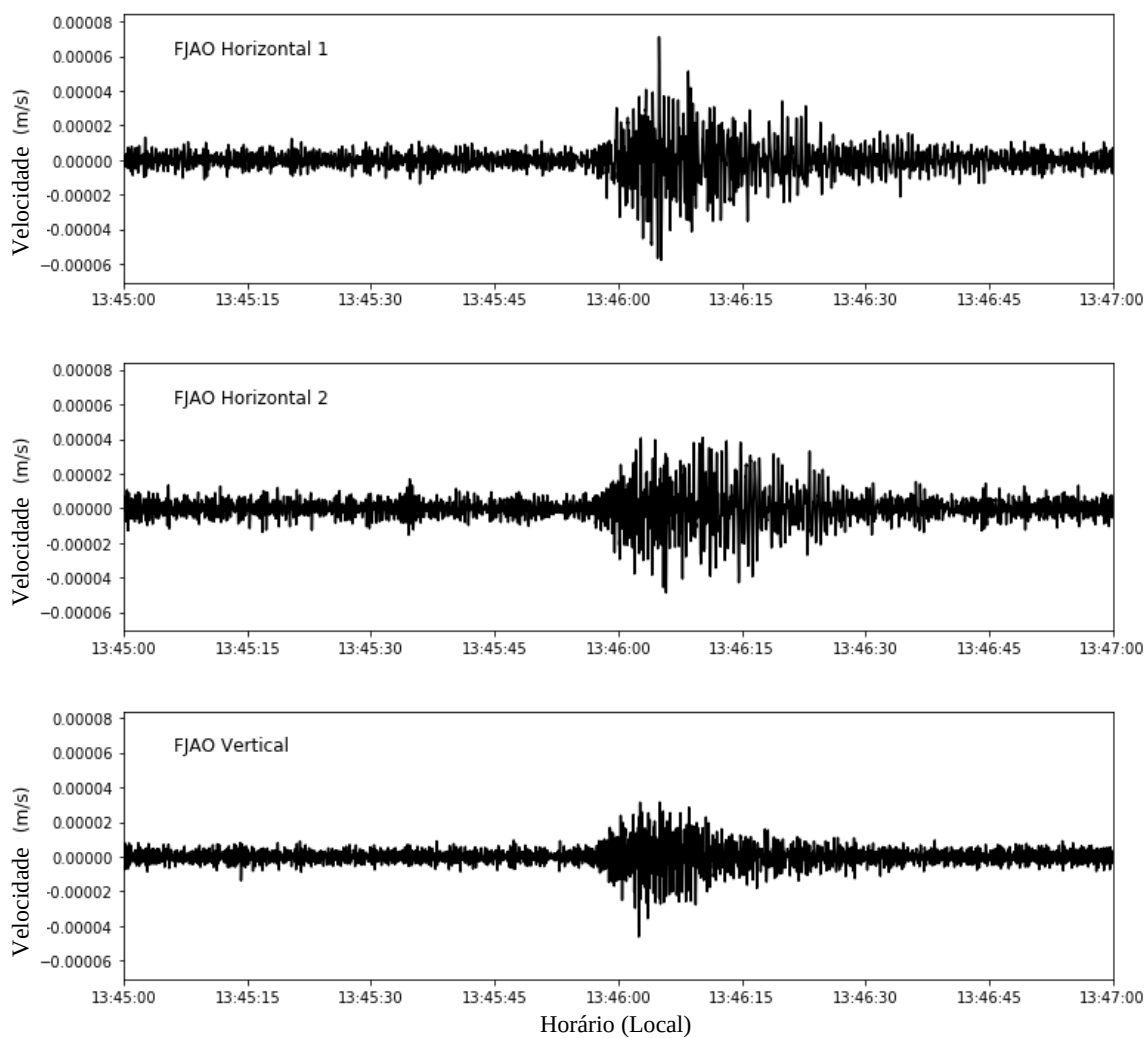


Figura 13: Dados sismográficos de FJAO de 13:45 às 13:47, horário local em 11 de junho de 2018

**Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento
da Barragem I do Feijão
Apêndice I – Análise Sísmica**

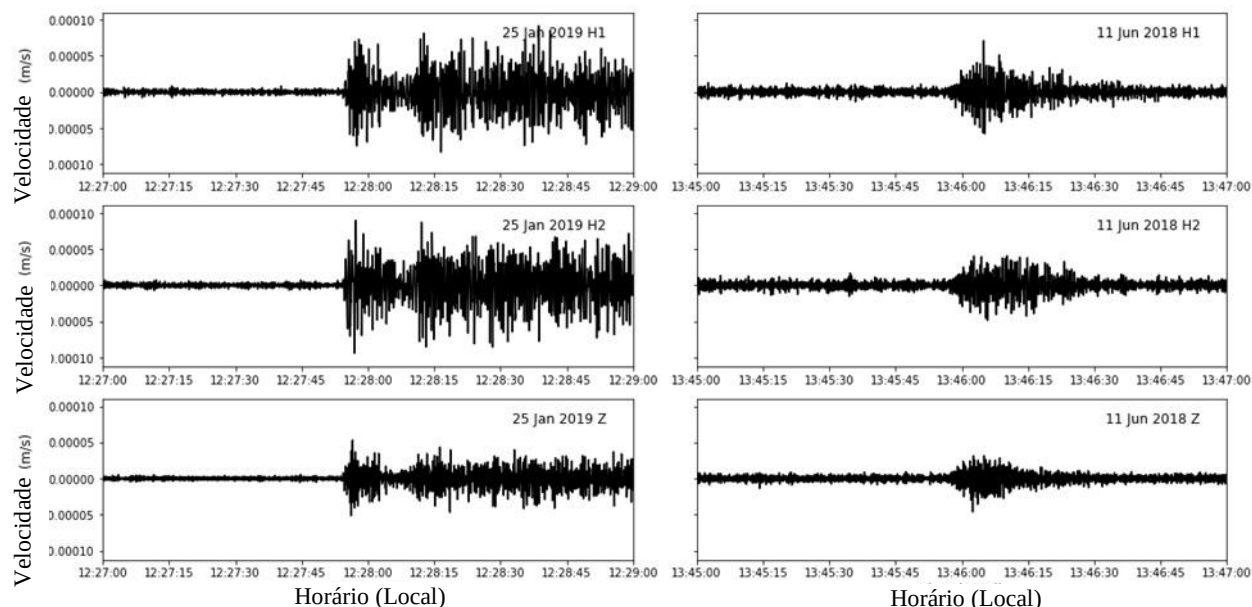


Figura 14: Comparação do Evento 1 em 25 de janeiro de 2019 com o evento em 11 de junho de 2018

3.2 Estações de Monitoramento Portáteis

De acordo com documentação, as vibrações do solo nas três estações de monitoramento portáteis não excederam o nível de gatilho de 5×10^{-4} m/s em 25 de janeiro de 2019 e, portanto, nenhum dado foi registrado.²¹ A observação de que as vibrações do solo não excederam 5×10^{-4} m/s é consistente com a revisão dos dados:

- A PV7 está localizada na Comunidade de Feijão, a uma distância de 3.368 m da CFJ. A velocidade de pico demonstrou ser proporcional à $D^{-1.54}$ em que D é a distância de uma detonação.²² Assim, a velocidade de pico estimada em PV7 devido ao Evento 2 é de aproximadamente 3×10^{-4} m/s, que é menos do que o nível de gatilho do instrumento.
- O PV16 está na crista da Barragem VI em CFJ, a 1.482 m do centro da escavação. Embora a velocidade de pico estimada nessa distância exceda o nível de gatilho do instrumento, o instrumento está localizado na crista da Barragem VI, o que pode ter reduzido a velocidade de pico.
- O PV17 estava no topo da Barragem I e provavelmente foi destruído durante o rompimento.

²¹ Relatório de Monitoramento Sismográfico da Vale, pág. 11.

²² Dowding, C.H. (1985). *Blast vibration monitoring and control*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

**Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento
da Barragem I do Feijão
Apêndice I – Análise Sísmica**

4. CONCLUSÕES

As seguintes conclusões foram alcançadas com base na revisão, análise e interpretação dos dados sísmográficos para a estação permanente da FJAO em 25 de janeiro de 2019, e para as quatro datas anteriores, e documentação em três estações de monitoramento portáteis na ou próximo à CFJ:

- As vibrações do solo registradas em FJAO em 25 de janeiro de 2019 não têm as características de um terremoto natural, o que é confirmado por avaliações da Universidade de São Paulo e da Universidade de Brasília.
- Vibrações no solo de baixa velocidade (Evento 1) foram observadas em FJAO aproximadamente 28 segundos antes do rompimento da Barragem I ser observada. O Evento 1 não apresenta as características de uma detonação com base em comparações com eventos de detonação conhecidos em quatro datas anteriores em janeiro de 2019. A velocidade de pico do Evento 1 (9×10^{-5} m/s) foi muito pequena. Para comparação, níveis seguros de vibração do solo para estruturas residenciais geralmente variaram de aproximadamente $1,5 \times 10^{-2}$ m/s a 5×10^{-2} m/s.
- O Evento 2 em 25 de janeiro de 2019 é consistente com uma detonação com base em uma comparação com eventos de detonação conhecidos em quatro datas anteriores. O Evento 2 ocorreu aproximadamente seis minutos *após* o início do rompimento ter sido observado e teve um pico de velocidade de 3×10^{-3} m/s.
- A gama dos picos cíclicos de deformação por cisalhamento associada aos eventos de detonação no poço de mineração da CFJ variam a partir de aproximadamente 1×10^{-3} até a 5×10^{-3} por cento, o que é aproximadamente uma ordem de magnitude menor que o (mínimo) limiar de deformação por cisalhamento de 3×10^{-2} por cento.
- Um evento foi observado em 11 de junho de 2018 durante o incidente de perfuração no DHP 15 que teve uma velocidade semelhante à velocidade de pico do Evento 1 em 25 de janeiro de 2019. O evento de 11 de junho também teve uma duração semelhante ao subevento inicial que ocorreu dentro do Evento 1.